

[DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20)

Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик

В.Л. Макаров^a 

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин^a 

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

Г.Л. Бекларян^a 

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

А.С. Акопов^{b,a} 

E-mail: aakopov@hse.ru

^a Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук
Адрес: 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

^b Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

Аннотация

В статье представлен новый подход к разработке «цифрового двойника» производственного предприятия, на примере завода по выпуску телевизионной техники. Особенностью предлагаемого подхода является применение гибридных методов агентного и дискретно-событийного имитационного моделирования, с использованием которых реализована компьютерная модель сложного производственного процесса сборки готовой продукции (телевизоров) из поступающих комплектующих. Важнейшими требованиями, предъявляемыми к подобной системе, является интегрируемость всех ключевых звеньев цифрового завода: конвейерных линий, складов с комплектующими и готовой продукцией, сортировочно-конвейерной системы, сборочного цеха, отдела технического контроля, упаковочного цеха и других подразделений. Предлагаемая имитационная модель реализована в системе AnyLogic, поддерживающей возможности применения методов агентного и дискретно-событийного моделирования в рамках одной модели, а также использования встроенного генетического алгоритма для оптимизации основных параметров модели — наиболее важных производственных характеристик (например, времени сборки одного изделия или числа сотрудников, задействованных в процессах сборки, контроля качества и упаковки). С помощью разработанной модели проведены оптимизационные эксперименты при различных интенсивностях загрузки конвейерных линий комплектующими, различных ограничениях на трудовые ресурсы и др. Исследованы три сценария поведения производственной системы: отсутствие дефицита комплектующих с возможностью существенного увеличения привлекаемых трудовых ресурсов, дефицит комплектующих при сохранении спроса на конечную продукцию, наличие жестких ресурсных ограничений на число сотрудников, задействованных в процессах на фоне профицита комплектующих.

Ключевые слова: цифровой завод; производственные процессы; агентное моделирование; дискретно-событийное моделирование; генетический алгоритм; AnyLogic.

Цитирование: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

Введение

В настоящее время для многих промышленных предприятий становится все более актуальной задача рационального управления производственными характеристиками в условиях динамично меняющейся внешней среды (например, резкого снижения объемов поставок комплектующих, существенного увеличения стоимости сырья, дефицита трудовых ресурсов). При этом сложность производственных и логистических процессов зачастую не позволяет предприятиям быстро адаптироваться за счет оперативного управления собственными ресурсами (например, уменьшать объем производства, не сокращая при этом персонал, или менять структуру производственного портфеля без существенных капиталовложений). Причиной возникающих проблем, как правило, является несбалансированное состояние различных звеньев производственной цепочки (например, дефицит производственных мощностей при существенной скорости оборачиваемости складских запасов). Поэтому требуется разработка систем поддержки принятия решений (СППР), основанных на построении «цифровых двойников» предприятий, с помощью которых можно определить наилучшие значения характеристик производственного процесса при различных сценарных условиях (например, при резком изменении спроса на конечную продукцию или при возникновении перебоев в поставках сырья и комплектующих).

Первые работы, посвященные проблемам рационального производственного планирования, относятся к середине XX века. Следует выделить наиболее важные работы по исследованию рациональной организации производственной деятельности с использованием методов системной динамики [1, 2]. Также хорошо известны разработки по применению теории систем массового обслуживания (СМО) [3, 4] для управления сложными производственными и логистическими процессами [5, 6]. Главной задачей подобных методов, развиваемых в рамках известного научного направления исследования операций

[7], является оптимизация характеристик цепочек создания конечной продукции, например, минимизация затрат, максимизация скорости оборачиваемости складских запасов, оптимизация количества и структуры задействованных трудовых ресурсов, обеспечение требуемого уровня качества и своевременности поставок готовой продукции [8].

В настоящее время для моделирования производственных и финансовых характеристик предприятия применяются методы системной динамики [9–11], агентного моделирования [12–14], дискретно-событийного моделирования [15, 16], эвристические методы оптимизации класса генетических алгоритмов [17–19] и некоторые другие. Например, в работе [10] представлена разработанная с использованием методов системной динамики имитационная модель вертикально-интегрированной нефтяной компании, включающей звенья нефтедобычи, нефтепереработки, транспортировки и сбыта. Преимуществом данной модели является возможность максимизации акционерной стоимости нефтяной компании при множественных ограничениях и с учетом влияния системы обратных связей, возникающих в производственно-сбытовой цепочке.

Следующим этапом в развитии подобных интеллектуальных производственных систем является создание так называемых «цифровых двойников» [20–24], которые построены на имитационных моделях, интегрированных с базами данных, хранилищами данных и оптимизационными модулями. Так, в работе [20] представлен «цифровой двойник» организации, оказывающей финансовые услуги, а в статье [21] предложена имитационная модель добывающего предприятия, реализованная в системе Powersim.

В данной статье развивается методология построения «цифровых двойников» производственного предприятия на основе методов дискретно-событийного и агентного моделирования, с реализацией в системе AnyLogic [25]. Предложена новая имитационная модель класса «цифровой завод» (на примере предприятия, осуществляющего сборку телевизионной техники) и выполнена оптимизация наиболее

важных параметров производственной системы по критерию значения накопленной валовой прибыли при различных сценарных условиях.

1. Концепция цифрового завода

В настоящее время телевизионная техника на большинстве российских заводов собирается из готовых комплектующих, производство которых осуществляется на других предприятиях с использованием импортной электронной компонентой базы (например, микропроцессоров, ЖК-дисплеев и т.д.). Несмотря на определенные недостатки (такие как полная зависимость от поставок импортных комплектующих), подобная организация производственного процесса позволяет существенно сократить операционные издержки, в основном за счет привлечения менее дорогостоящей (местной) рабочей силы, а также минимизации транспортных и налоговых издержек.

Концептуальная модель «цифрового завода» основана на создании ряда взаимодействующих подсистем, среди которых наиболее важными являются следующие:

♦ **подсистема имитационного моделирования**, обеспечивающая возможность вычисления производственных и финансовых характеристик предприятия, с учетом детализации всей цепочки создания конечного продукта для управления на микроуровне. Имитационная модель предприятия, осуществляющего сборку телевизионной техники, включает следующие элементы:

1. **источники поставок комплектующих**, необходимых для сборки конечной продукции (в частности, к подобным комплектующим относятся корпуса, жидкокристаллические экраны, системные платы, видеоадаптеры, блоки обработки изображения, блоки питания и др.), поступающих на завод в соответствии с заданной интенсивностью;
2. **склады комплектующих**, предназначенные для временного хранения промежуточной продукции (деталей) и их поставок на конвейерные линии;
3. **сортировочно-конвейерная система**, предназначенная для автоматической синхронизации потоков с комплектующими, имеющими различные технические и эксплуатационные характеристики. К таким характеристикам, в частности, относятся размер жидкокристаллического экрана (который варьируется от 20 до 90 дюймов), а также размер корпуса;

4. **сборочный цех**, обеспечивающий сборку готовой продукции с использованием привлекаемых специалистов (трудовых ресурсов);
5. **отдел технического контроля**, обеспечивающий контроль качества конечной продукции (тестирование устройств);
6. **упаковочный цех**, выполняющий функцию упаковки, комплектования и формирования партий готовой продукции;
7. **склад готовой продукции**, предназначенный для временного хранения телевизионной техники;
8. **отдел отгрузки**, обеспечивающий функцию отгрузки партий готовой продукции посредством ее передачи транспортной компании;

♦ **хранилище данных**, предназначенное для хранения исходных данных, необходимых для имитационного моделирования и обработки результатов оптимизационных экспериментов;

♦ **оптимизационный модуль**, агрегированный по целевым функционалам с имитационной моделью предприятия и обеспечивающий возможность поиска наилучших значений характеристик производственного процесса при различных сценарных условиях.

Укрупненная схема «цифрового двойника» предприятия, осуществляющего сборку телевизионной техники, представлена на *рисунке 1*.

Отметим, что важной особенностью рассматриваемой системы (*рисунок 1*) является наличие агентов, участвующих в производственном процессе. К ним относятся:

- ♦ **агенты-комплектующие** со своими индивидуальными характеристиками;
- ♦ **агенты-изделия**, дифференцируемые по своим функциональным характеристикам (например, модель телевизора, размер матрицы, стоимость и т.д.);
- ♦ **агенты-партии** готовой продукции, представляющие собой группировку агентов-изделий (по моделям) для транспортировки;
- ♦ **агенты-ресурсы**, задействованные в различных процессах (например, сборщики, специалисты ОТК, упаковщики и др.).

При этом производственная система обеспечивает механизм автоматической трансформации агентов-комплектующих в агентов-готовые изделия, а также группировку агентов-изделий в партии готовой продукции.

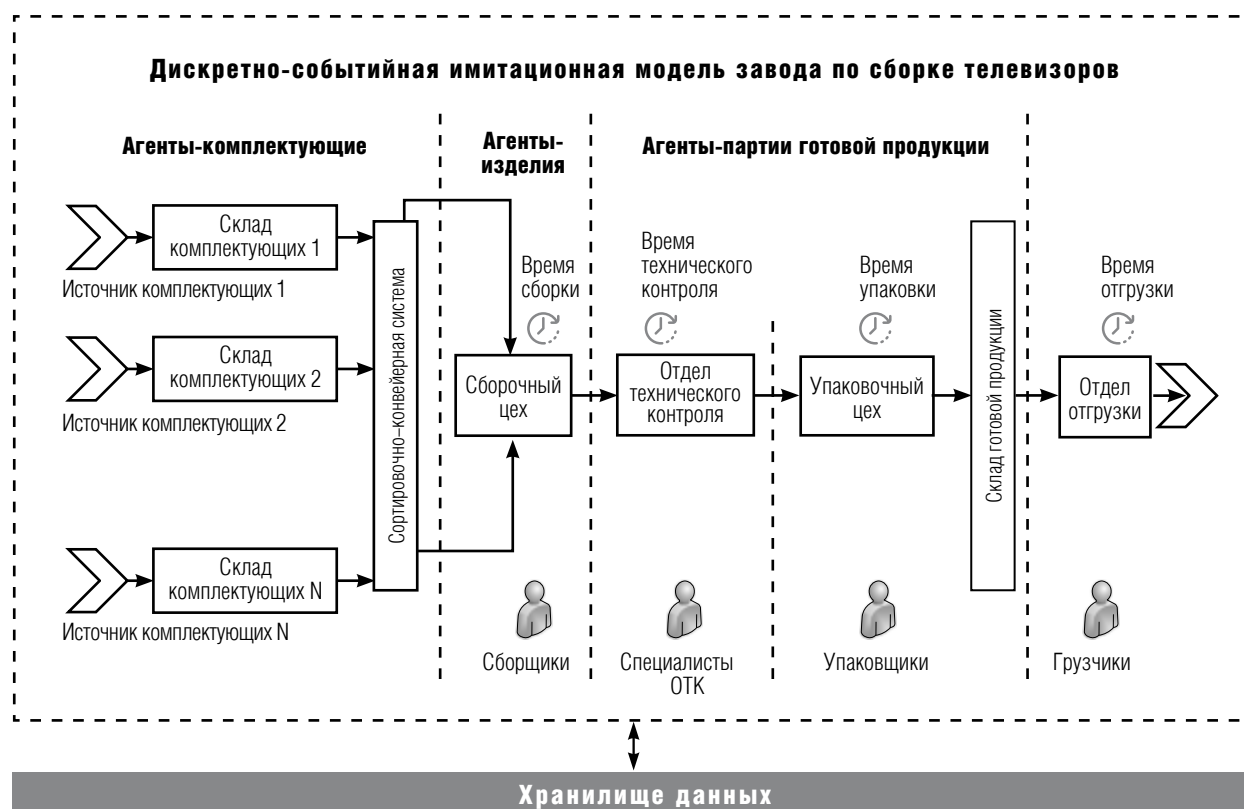


Рис. 1. Укрупненная схема «цифрового двойника» производственного предприятия

2. Имитационная модель

Ранее, в работе [21] была представлена имитационная модель сборочного цеха, реализованная в системе AnyLogic. Эта модель может рассматриваться в качестве прототипа при создании более сложной модели гибридного типа, в которой одновременно применяются методы системной динамики, агентного и дискретно-событийного моделирования. Другим важным отличием предлагаемой в данной статье модели является более сложная структура и динамика поставок комплектующих, характеризующаяся наличием множественных временных разрывов. При этом основные сервисные характеристики производственного процесса (в частности, время сборки, технического контроля, отгрузки и т.д.), существенно влияющие на его результативность, являются стохастическими. В результате метрика результативности подобной системы (динамика прибыли) относится к классу мультимодальных целевых функций с множественными точками разрыва, максимизация которой не может быть выполнена известными аналитическими методами. Поэтому для создания «цифрового двойника» производственного предприятия, осу-

ществляющего сборку телевизионной техники, разрабатывается оригинальная имитационная модель, агрегированная по целевому функционалу со встроенным генетическим алгоритмом, обеспечивающим поиск наилучших решений на основе эвристики.

Приведем краткую постановку задачи оптимизации ключевых характеристик рассматриваемого производственного предприятия. Для этого введем следующие обозначения:

♦ $t_r \in T$ – дискретное модельное время; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$ – набор моментов модельного времени; $|T|$ – общее число моментов модельного времени;

♦ $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{|I|}\}$ – набор индексов моделей собираемой телевизионной техники (дифференцируемой, в частности, по размеру экрана, функциональным характеристикам и др.); $|I|$ – общее число собираемых моделей телевизоров;

♦ $J_i = \{j_1, j_2, \dots, j_{|J_i|}\}, i \in I$ – набор индексов комплектующих, необходимых для сборки телевизионной техники i -го типа (например, корпуса, ЖК экраны, системные платы и др.); $|J_i|$ – общее число

комплектующих, необходимых для сборки телевизора i -го типа;

♦ $\{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ – число специалистов различных категорий (сборщиков первой и второй категорий, специалистов ОТК, упаковщиков и грузчиков), задействованных в производственных процессах, чел.; N – общее количество квалификационных категорий сотрудников; $\xi = \{1, 2, \dots, N\}$ – индекс категории сотрудников и типов процессов, в которых они задействованы;

♦ $\{w_1(t_r), w_2(t_r), \dots, w_N(t_r)\}, t_r \in T$ – суточная заработная плата специалистов различных категорий, задействованных в производственных процессах, руб.;

♦ $c_{j_i}(t_r), j_i \in J_i, i \in I, t_r \in T$ – стоимость комплектующих, требуемых для сборки i -й модели телевизора в момент времени t_r , руб.;

♦ $p_i(t_r), i \in I, t_r \in T$ – стоимость единицы готовой продукции (телевизора) в момент времени t_r , руб.;

♦ $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$ – среднее время сборки готового изделия из основных и вспомогательных деталей, время технического контроля, время упаковки и отгрузки в расчете на одного сотрудника, задействованного в соответствующих операциях;

♦ $\delta_{j_i}(t_r), j_i \in J_i, i \in I, t_r \in T$ – эндогенная структура поставок комплектующих в момент времени t_r , задаваемая с использованием единичной импульсной функции со случайными аргументами, шт.;

♦ $v_i(t_r), i \in I, t_r \in T$ – эндогенная структура выпуска готовой продукции в момент времени t_r , определяемая в результате имитационного моделирования и зависящая от наборов управляющих параметров $\{n_1, n_2, \dots, n_N\}, \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$, а также динамики поставок комплектующих $\delta_{j_i}(t_r)$, шт.

Суточная валовая прибыль предприятия в момент времени $t_r, t_r \in T$:

$$\pi(t_r) = \sum_{i=1}^{|I|} \left((v_i(t_r) p_i)(t_r) - \sum_{j_i=1}^{|J_i|} \delta_{j_i}(t_r) c_{j_i}(t_r) \right) - \sum_{\xi=1}^N w_{\xi}(t_r) n_{\xi}. \quad (1)$$

Теперь можно сформулировать центральную задачу производственного предприятия по максимизации накопленной валовой прибыли.

Задача. Требуется максимизировать накопленную валовую прибыль по наборам управляющих параметров $\{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ и $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$:

$$\sum_{t_r=1}^{|T|} \pi(t_r) \rightarrow \max_{\{n_1, n_2, \dots, n_N\}, \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}}, \quad (2)$$

при ограничениях: $\underline{n}_{\xi} \leq n_{\xi} \leq \bar{n}_{\xi}, \tau_{\xi} \leq t_{\xi} \leq \bar{\tau}_{\xi}$.

Здесь $\{\underline{n}_{\xi}, \bar{n}_{\xi}\}, \{\tau_{\xi}, \bar{\tau}_{\xi}\}$ – известные граничные (верхние и нижние) значения управляющих параметров.

Предложенная имитационная модель, обеспечивающая вычисление целевого функционала (1)–(2), реализована в системе AnyLogic (рисунк 2). Отличительной особенностью модели является высокая размерность потоков исходных данных (десятки тысяч комплектующих, участвующих в процессе сборки телевизионной техники со своими индивидуальными характеристиками), что, в частности, обуславливается наличием большого числа элементов типа «склад», используемых для хранения промежуточной и конечной продукции, а также применением сортировочно-конвейерных систем для синхронизации потоков агентов-комплектующих (рисунк 2).

Другой важной особенностью модели, представленной на рисунке 2, является интеграция блока расчета финансово-экономических показателей с операционными подмоделями, реализующими процессы получения и распределения комплектующих посредством сортировочно-конвейерных систем, сборку, технический контроль, упаковку и формирование партий, дифференцируемых по видам продукции (например, в зависимости от размера диагонали экрана и заданного набора функций). Исходные данные по агентам-комплектующим (характеристики деталей) загружаются из базы данных системы с учетом переменного числа деталей каждого вида, одновременно поступающих в соответствии с заданной интенсивностью. Программная реализация имитационной модели выполнена с использованием языка программирования Java, поддерживаемого в системе AnyLogic.

Для запуска последовательной обработки комплектующих в модели используется специальный объект типа **source** (источник комплектующих), в котором выполняется переопределение характеристик каждого генерируемого агента, принадлежащего к классу **Components_X** (комплектующие типа **X**), в специальном поле – «Действия при подходе к выходу»:

```
((Components_X) entity).parameter = components_X.  
get(index_X).parameter;  
index_X = index_X ++;
```

Здесь **Components_X** – популяция агентов-комплектующих типа **X** с характеристиками, значения которых динамически загружаются из хранилища данных (MS SQL Server), **parameter** – один

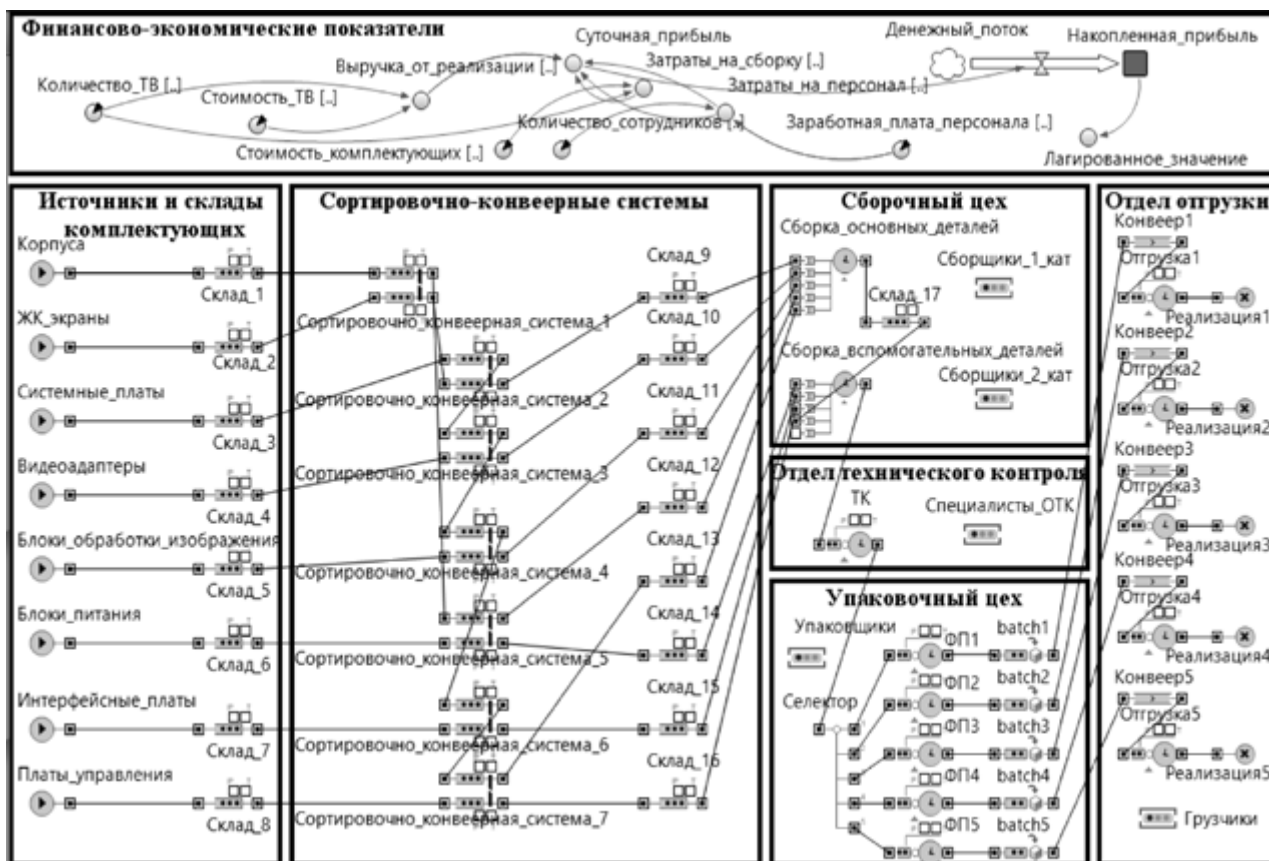


Рис. 2. Имитационная модель завода по производству телевизионной техники в AnyLogic

возможных параметров агента-комплектующего ((**Components_X**) entity), например, габаритный размер корпуса, **index_X** — глобальная переменная, используемая как итератор для доступа к очередному члену популяции **Components_X** (т.е. агенту-комплектующему). Отметим, что, начиная с версии AnyLogic 8, в системе поддерживается более простая форма доступа к данным агента, участвующего в процессной цепочке, с использованием атрибута **agent** вместо ((**Components_X**) entity). При этом при создании множественных заявок метод «**Действия при подходе к выходу**» также выполняется многократно для каждого агента-комплектующего, исходящего из источника (рисунк 3). Количество агентов-комплектующих генерируемых в каждый момент времени, задается посредством единичной импульсной функции со случайными аргументами, определяющими вероятное количество деталей, которые поступят в случае прихода данной партии:

```
(int) pulse(uniform(0, 100), uniform(0, 100))*uniform_discr(1000, 1500);
```

Также одним из наиболее важных элементов предлагаемой модели является формирование партий готовой продукции посредством распределения потока прошедшей технический контроль телевизионной техники на группы в зависимости от типа агента-изделия (т.е. модели телевизора) (рисунк 4).

Поскольку стоимость готовой продукции зависит от модельного ряда собираемой телевизионной техники, при расчете выручки и затрат можно использовать показатели, значения которых вычисляются в элементах диаграммы процессов (рисунк 2). Например, количество собираемых телевизоров различных типов задается следующим образом:

```
Количество_TB.set(Реализация1.count() * batch1_size, M);
```

Здесь **Реализация1.count()** — функция, обеспечивающая вычисление количества элементов (агентов-изделий первого вида) на выходе из производственного процесса, **batch1_size** — количество изделий в партии, **M** — индекс модели телевизора.

Корпуса - Source

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип заявки:

Прибывают согласно:

Интенсивность прибытия:

За 1 раз создается несколько заявок: ☒

Кол-во заявок, прибывающих за 1 раз:

Ограниченное кол-во прибытий: ☐

Новая заявка: (чтобы создать другой тип, добавьте его из палитры)

Местоположение прибытия:

Специфические

Установить время начала: ☐

Добавить заявки в: ☒ Популяцию по умолчанию ☐ Другую популяцию агентов

Выталкивать заявки: ☒

Действия

До прибытия:

При подходе к выходу:

```
((Components_1) entity).parameter1 = components_1.get(index_1).parameter1;
((Components_1) entity).parameter2 = components_1.get(index_1).parameter2;
((Components_1) entity).parameter3 = components_1.get(index_1).parameter3;
((Components_1) entity).parameter4 = components_1.get(index_1).parameter4;
((Components_1) entity).parameter5 = components_1.get(index_1).parameter5;
index_1 = index_1 + 1;
```

При выходе:

Специфические

Описание

Рис. 3. Свойства типового источника поставок агентов-комплектующих

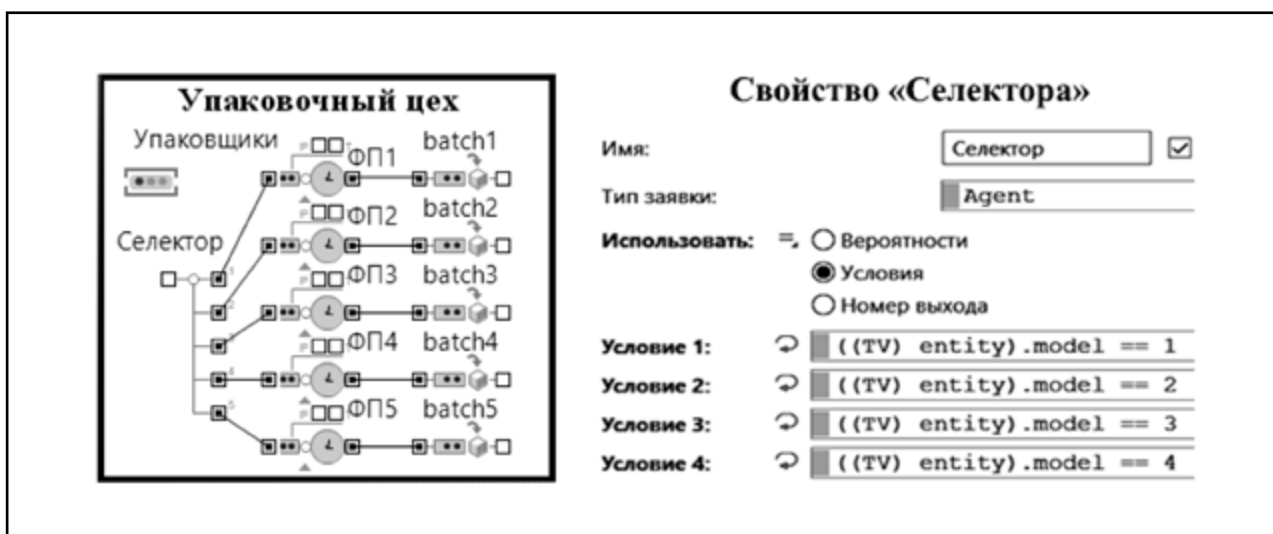


Рис. 4. Распределение потока готовой продукции при формировании партий

3. Результаты экспериментов

Как было отмечено ранее, источники поставок агентов-комплектующих обеспечивают генерацию необходимых для сборки компонент посредством единичной импульсной функции со случайными аргументами. На *рисунке 5* показана динамика подобных поставок на интервале модельного времени от 1 до 100 дней.

Как следует из *рисунка 5*, между поставками комплектующих существуют временные разрывы, обусловленные естественными логистическими сбоями. Поэтому в модели обеспечивается автоматическая синхронизация входных потоков посредством сортировочно-конвейерных систем, перенаправляющих отобранные и взаимно соответствующие детали в сборочный цех.

На *рисунке 6* представлена модельная динамика складских запасов основных и вспомогательных деталей, а также готовых изделий (телевизоров).

Далее были выполнены оптимизационные эксперименты, направленные на максимизацию прибыли, формируемой в результате сборки и реализации телевизионной техники. Оптимизационные эксперименты были выполнены с использованием встроенного в AnyLogic генетического алгоритма. При этом в качестве переменных-решений выбраны следующие управляющие параметры модели:

♦ **количество агентов-сборщиков** (людей) различных категорий, участвующих в процессах сборки основных и вспомогательных деталей;

♦ **количество агентов-специалистов ОТК**, отвечающих за выполнение технического контроля готовой продукции;

♦ **количество агентов-упаковщиков и агентов-грузчиков**, участвующих в процессах упаковки и отгрузки готовой продукции;

♦ **средние (медианные) значения времени сборки, технического контроля, упаковки и отгрузки** (реализации), влияющие на скорость исполнения соответствующих процессов.

При этом рассматривались три сценария поведения моделируемой производственной системы:

Сценарий 1. Отсутствие дефицита комплектующих с возможностью существенного увеличения привлекаемых трудовых ресурсов.

Сценарий 2. Дефицит комплектующих при сохранении спроса на конечную продукцию.

Сценарий 3. Наличие жестких ресурсных ограничений на число сотрудников, задействованных в процессах на фоне профицита комплектующих.

На *рисунке 7* представлены результаты оптимизационных экспериментов.

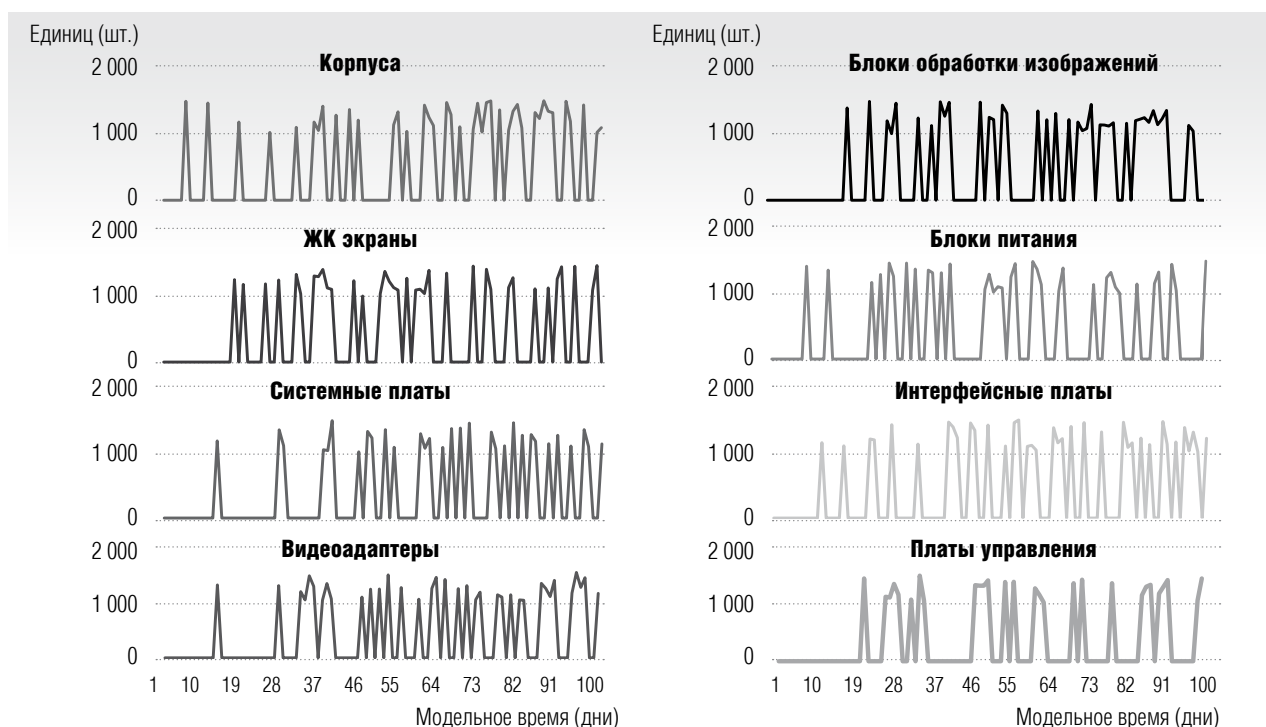


Рис. 5. Модельная динамика поставки комплектующих

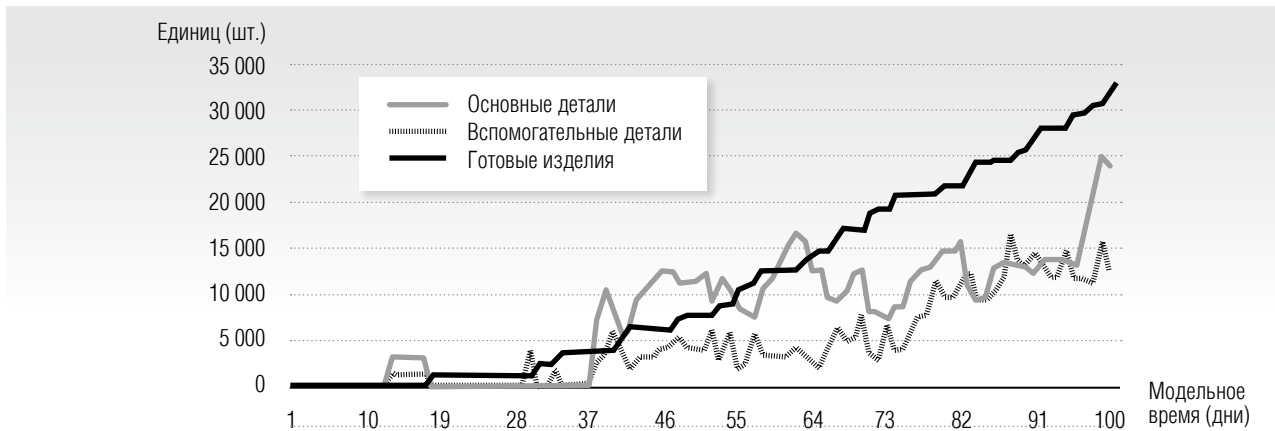


Рис. 6. Модельная динамика складских запасов

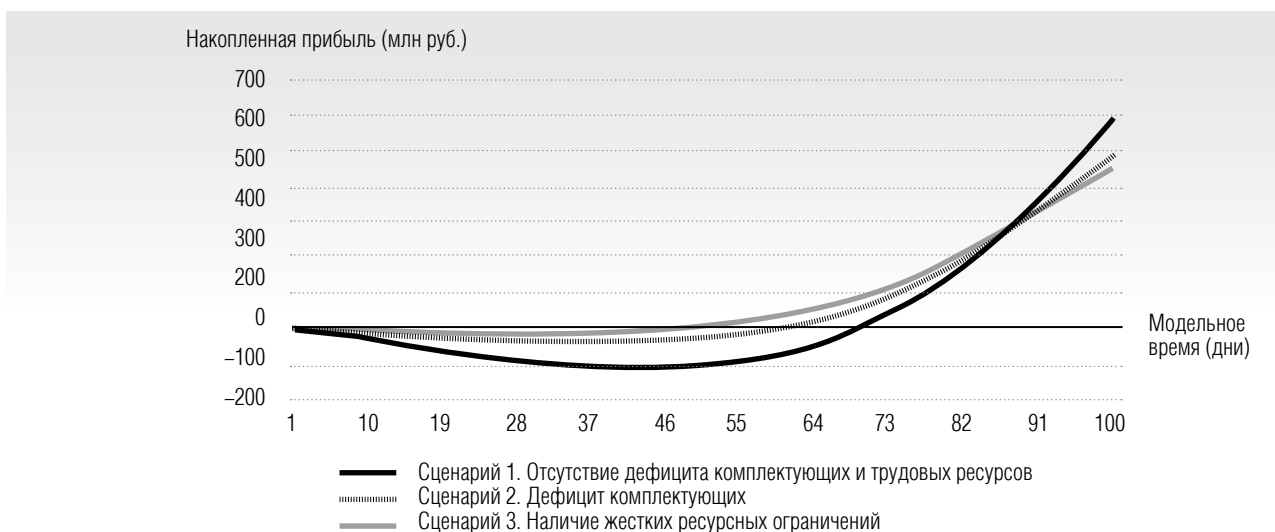


Рис. 7. Результаты оптимизационных экспериментов (накопленная прибыль)

В таблице 1 показаны численные значения искомых переменных, полученные в результате оптимизации для трех рассматриваемых сценариев поведения исследуемой производственной системы.

Как следует из рисунка 7 и таблицы 1, применение генетического алгоритма для оптимизации характеристик разработанной дискретно-событийной имитационной модели позволило определить наилучшие (субоптимальные) значения искомых переменных, соответствующие трем принципиально различающимся сценариям поведения производственной системы. При этом динамика накопленной валовой прибыли в основном устойчива по отношению к исследуемым сценариям. Например, в условиях дефицита комплектующих (Сценарий 2) за счет значительного сокращения количества при-

влеченных трудовых ресурсов при одновременном уменьшении времени выполнения производственных операций (т.е. при увеличении производительности труда) можно обеспечить значительный уровень накопленной прибыли. Также близкий финансовый результат можно получить в условиях жестких ресурсных ограничений и отсутствия дефицита комплектующих (Сценарий 3).

Заключение

В данной статье представлен новый подход к разработке «цифрового двойника» производственного предприятия (на примере завода по сборке телевизионной техники), основанный на комбинированном применении методов дискретно-событийного и агентного имитационного моделирования. Пред-

Таблица 1.

Значения искомых переменных и результаты оптимизации

Параметр модели	Сценарий 1: Отсутствие дефицита комплектующих и трудовых ресурсов	Сценарий 2: Дефицит комплектующих	Сценарий 3: Наличие жестких ресурсных ограничений
Количество агентов–сборщиков первой категории, чел.	1000	430	125
Количество агентов–сборщиков второй категории, чел.	500	225	84
Количество агентов–специалистов ОТК, чел.	100	30	15
Количество агентов–упаковщиков, чел.	100	27	13
Количество агентов–грузчиков, чел.	50	20	10
Среднее время сборки, дней	0,1	0,05	0,03
Среднее технического контроля, дней	0,01	0,01	0,008
Среднее время упаковки, дней	0,01	0,07	0,05
Среднее время отгрузки, дней	7	5	4
Накопленная валовая прибыль в момент времени T=100, млн. руб.	619	494	468

ложена концептуальная модель цифрового завода, с последующей программной реализацией в системе имитационного моделирования AnyLogic. Сформулирована и решена важнейшая задача производственного предприятия по максимизации валовой накопленной прибыли с учетом вклада операционной составляющей, в том числе динамики объема выпуска готовой продукции, численности сотрудников, задействованных в различных процессах, времени исполнения производственных операций и др. Выполнены численные исследования, в частности, оптимизационные эксперименты, подтверждающие возможность определения наилучших решений, обеспечивающих устойчивость накопленной валовой прибыли предприятия по отношению к различным характеристикам внешней среды (например, в условиях дефицита комплектующих и жестких ресурсных ограничений).

Результаты имитационного моделирования демонстрируют возможность получения накопленной валовой прибыли производственного предприятия,

устойчивой по отношению к сценарным характеристикам внешней среды. Например, при возникновении дефицита комплектующих (Сценарий 2), а также в условиях жестких ресурсных ограничений и отсутствия дефицита комплектующих (Сценарий 3) можно обеспечить уровень накопленной прибыли близкой к финансовому результату, характерному для первого сценария с отсутствием подобных ограничений.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие методов разработки «цифровых двойников» производственных предприятий с более сложной организационной структурой и вложенными (иерархическими, многоуровневыми) процессами. ■

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), в рамках научного проекта № 18-29-03139.

Литература

1. Forrester J.W. Industrial dynamics. MIT Press, 1961.
2. Sterman J.D. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. McGraw Hill, 2000.
3. Saaty T.L. Elements of queuing theory with applications. Dover Pubns, 1983.

4. Sundarapandian V. Probability, statistics and queueing theory. PHI Learning, 2009.
5. Rashid R., Hoseini S.F., Gholamian M.R., Feizabadi M. Application of queueing theory in production-inventory optimization // *International Journal of Industrial Engineering*. 2015. No 11. P. 485–494. DOI: 10.1007/s40092-015-0115-9.
6. Marsudi M., Shafeek H. Production line performance by using queueing model // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control. Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013. Vol. 46. No 9. P. 1152–1157.
7. Wetherbe J.C. Systems analysis for computer-based information systems. West Publishing, 1979.
8. Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. Wiley, 2004.
9. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Системная динамика. М.: ЦЭМИ РАН, 2014.
10. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220–230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.
11. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // *Cybernetics and Information Technologies*. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87–103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.
12. Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Агентное моделирование. М.: ЦЭМИ РАН, 2016.
13. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008.
14. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // *Environmental Modelling and Software*. 2019. No 116. P. 7–25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.
15. Акопов А.С. Имитационное моделирование. М.: Юрайт, 2014.
16. Tang J., Leu G., Abbass H.A. Discrete event simulation / Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving. IEEE, 2020. P. 121–142.
17. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. Cluster-based optimization of an evacuation process using a parallel bi-objective real-coded genetic algorithm // *Cybernetics and Information Technologies*. 2020. Vol. 20. No. 3. P. 45–63. DOI: 10.2478/cait-2020-0027.
18. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M., Verma D.B. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimization // *Knowledge-Based Systems*. 2019. No 174. P. 103–122. DOI: 10.1016/j.knsys.2019.03.003.
19. Akopov A.S. Parallel genetic algorithm with fading selection // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 49. No. 3/4. P. 325–331. DOI: 10.1504/IJCAT.2014.062368.
20. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Разработка цифровых двойников для финансовых организаций // *Аудит и финансовый анализ*. 2019. № 5. С. 38–45.
21. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. Developing digital twins for production enterprises // *Business Informatics*. 2019. Vol. 14. No 1. P. 7–16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16.
22. Saddik A.El. Digital twins: The convergence of multimedia technologies // *IEEE MultiMedia*. 2018. Vol. 25. No 2. P. 87–92. DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
23. Digital twin-driven product design framework / F. Tao [et al.] // *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 57. No 12. P. 3935–3953. DOI: 10.1080/00207543.2018.1443229.
24. Xu Y., Sun Y., Liu X., Zheng Y. A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning // *IEEE Access*. 2019. No 7. P. 19990–19999. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.
25. Borshchev A. The Big Book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America, 2013.

Об авторах

Макаров Валерий Леонидович

доктор физико-математических наук; академик Российской академии наук;
 научный руководитель, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;
 E-mail: makarov@cemi.rssi.ru
 ORCID: 0000-0002-2802-2100

Бахтизин Альберт Рауфович

доктор экономических наук; член-корреспондент Российской академии наук;
 директор, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;
 E-mail: albert@cemi.rssi.ru
 ORCID: 0000-0002-9649-0168

Бекларян Гаянэ Леоновна

кандидат экономических наук;
 старший научный сотрудник, лаборатория компьютерного моделирования социально-экономических процессов, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;
 E-mail: glbeklaryan@gmail.com
 ORCID: 0000-0002-1286-0345

Акопов Андраник Сумбатович

доктор технических наук;

профессор, департамент бизнес-информатики, Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20;

главный научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: aakopov@hse.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics

Valery L. Makarov^a

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

Albert R. Bakhtizin^a

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

Gayane L. Beklaryan^a

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Andranik S. Akopov^{b,a}

E-mail: aakopov@hse.ru

^a Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences
Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

^b National Research University Higher School of Economics
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia

Abstract

This article presents a new approach to the development of a 'digital twin' of a manufacturing enterprise, using a television manufacturing plant as the case study. The feature of the proposed approach is the use of hybrid methods of agent-based modeling and discrete-event simulation in order to implement a simulation model of a complex production process for assembling final products from supplied components. The most important requirement for such a system is the integration of all key chains of a digital plant: conveyor lines, warehouses with components and final products (TVs), sorting and conveyor system, assembly unit, technical control department, packing unit, etc. The proposed simulation model is implemented in the AnyLogic system, which supports the possibility of using agent-based and discrete-event modeling methods within one model. The system also supports using the built-in genetic algorithm to optimize the main parameters of the model: the most important production characteristics (for example, assembly time of a product, the number of employees involved in assembly, quality control and packaging processes). Optimization experiments were completed with the help of the developed model at various intensities of loading conveyor lines with components, various restrictions on labor resources, etc. Three scenarios of the production system behavior are investigated: the absence of the components deficit with the possibility of significantly increasing the labor resource involved, a components deficit while demand for final products is maintained, and the presence of hard restrictions on the number of employees who can be involved in the processes under conditions of components deficit.

Key words: digital plant; production processes; agent-based modeling; discrete-event simulation; genetic algorithm; AnyLogic.

Citation: Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2021) Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, vol. 15, no 2, pp. 7–20.
DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

References

1. Forrester J.W. (1961) *Industrial dynamics*. MIT Press.
2. Sterman J.D. (2000) *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw Hill.
3. Saaty T.L. (1983) *Elements of queueing theory with applications*. Dover Pubns.
4. Sundarapandian V. (2009) *Probability, statistics and queueing theory*. PHI Learning.
5. Rashid R., Hoseini S.F., Gholamian M.R., Feizabadi M. (2015) Application of queueing theory in production-inventory optimization. *International Journal of Industrial Engineering*, no 11, pp. 485–494. DOI: 10.1007/s40092-015-0115-9.
6. Marsudi M., Shafeek H. (2013) Production line performance by using queueing model. *Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013*, vol. 46, no 9, pp. 1152–1157.
7. Wetherbe J.C. (1979) *Systems analysis for computer-based information systems*. West Publishing.
8. Robinson S. (2004) *Simulation: The practice of model development and use*. Wiley.
9. Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2014) *System dynamics*. Moscow: CEMI RAS (in Russian).
10. Akopov A.S. (2012) Designing of integrated system-dynamics models for an oil company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 45, no 4, pp. 220–230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.
11. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2019) Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control. *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 19, no 2, pp. 87–103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.
12. Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2016) *Agent-based modeling*. Moscow: CEMI RAS (in Russian).
13. Bakhtizin A.R. (2008) *Agent-based models of the economy*. Moscow: Economics (in Russian).
14. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. (2019) Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia. *Environmental Modelling and Software*, no 116, pp. 7–25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.
15. Akopov A.S. (2017) *Simulation modeling*. Moscow: Urait (in Russian).
16. Tang J., Leu G., Abbass H.A. (2020) Discrete event simulation. *Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving*. IEEE, pp. 121–142.
17. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. (2020) Cluster-based optimization of an evacuation process using a parallel bi-objective real-coded genetic algorithm. *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 20, no 3, pp. 45–63. DOI: 10.2478/cait-2020-0027.
18. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Thakur M., Verma D.B. (2019) Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimization. *Knowledge-Based Systems*, no 174, pp. 103–122. DOI: 10.1016/j.knsys.2019.03.003.
19. Akopov A.S. (2014) Parallel genetic algorithm with fading selection. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 49, no 3/4, pp. 325–331. DOI: 10.1504/IJCAT.2014.062368.
20. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019) Developing digital twins for financial organisations. *Audit and Financial Analysis*, no 5, pp. 38–45 (in Russian).
21. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. (2019) Developing digital twins for production enterprises. *Business Informatics*, vol. 14, no 1, pp. 7–16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16.
22. Saddik A.El. (2018) Digital twins: The convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*, vol. 25, no 2, pp. 87–92. DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
23. Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu S.C.-Y., Nee A.Y.C. (2018) Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, vol. 57, no 12, pp. 3935–3953. DOI: 10.1080/00207543.2018.1443229.
24. Xu Y., Sun Y., Liu X., Zheng Y. (2019) A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Access*, no 7, pp. 19990–19999. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890566.
25. Borshchev A. (2013) *The Big Book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America.

About the authors

Valery L. Makarov

Dr. Sci. (Phys.-Math.); Academician of Russian Academy of Sciences;
Academic Supervisor, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;
E-mail: makarov@cemi.rssi.ru
ORCID: 0000-0002-2802-2100

Albert R. Bakhtizin

Dr. Sci. (Econ.); Corresponding Member of Russian Academy of Sciences;

Director, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-9649-0168

Gayane L. Beklaryan

Cand. Sci. (Econ.);

Senior Researcher, Laboratory of Computer Modeling of Social and Economic Processes, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1286-0345

Andranik S. Akopov

Dr. Sci. (Tech.);

Professor, Department of Business Informatics, Graduate School of Business, National Research University Higher School of Economics, 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia;

Chief Researcher, Laboratory of Dynamic Models of Economy and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: aakopov@hse.ru